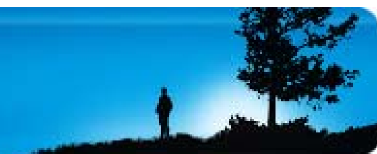


Métodos para Testes de Diagnóstico

Tradução: Victor López-Richard

Esclarecimentos sobre a tradução:

Siglas e abreviaturas em russo, não esclarecidas no texto, aparecerão entre parêntesis quadrados junto ao equivalente fonético em português:

Exemplo: PBV [ПБВ]

Foram usadas as palavras em inglês para identificar têrmos cuja tradução ao português foi impossível:

- stand-by (equivalente ao regime de trabalho em ponto morto)
- contactor (dispositivo do transformador)

As unidades das magnitudes físicas e as variáveis em fórmulas, equações e figuras foram todas adaptadas ao português.

Padrões de diagnóstico, baseados na medição de propriedades eletromagnéticas

1.Tipos de defeitos e suas características

O aparecimento de defeitos e danos, em muitos casos, provoca mudanças da resistência ativa e indutiva das bobinas, assim como da corrente e perdas no regime de stand-by. Desta maneira, os parâmetros do circuito equivalente do transformador (Fig.1) podem servir como padrões efetivos de diagnóstico.

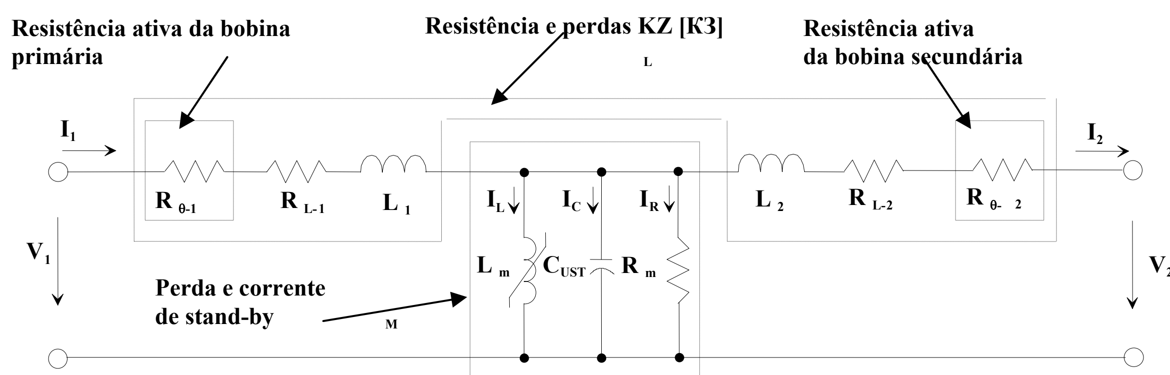


Fig.1 Parâmetros do circuito equivalente do transformador e características de diagnóstico respectivas.

Na tabela a continuação são mostrados os defeitos característicos revelados com ajuda de medições de corrente e perdas de stand-by, perdas e resistência do curto circuito, assim como mudanças nas bobinas da resistência à corrente contínua.

Tabela1. Tipos de danos e padrões de diagnóstico respectivos, baseados na medição de parâmetros do circuito equivalente

Mecanismo do dano	Tipo do defeito	Parâmetro de diagnóstico
Forças eletromagnéticas, provocadas pela corrente KZ [КЗ], modificam a geometria da bobina e, respectivamente, a magnitude da reactância de dissipação	Deformação da bobina	reactância de dispersão: **$[2\pi f(L_1+L_2)]$**
Dano no isolamento gera um contorno ligado ao principal fluxo magnético. A corrente circulante resultante provoca um aumento das componentes ativas e indutivas da corrente de magnetização e um aumento das perdas de stand-by	Curto inter-espiral a) Curto total de duas ou várias espirais b) Curto entre dois ou vários condutores paralelos, pertencentes a diferentes espirais	Corrente de magnetização **I_1** e perdas XX a través de **R_m**
Dano no isolamento gera um contorno ligado ao fluxo principal de dissipação. A corrente circulante resultante provoca um aumento das perdas complementarias no teste de curto-circuito	Curtos entre condutores paralelos; Curto das espirais nas bobinas introduzidas em transformadores de reatores e transformadores reguladores; danos no isolamento dos parafusos de compressão	Perdas complementarias: **$[P_{KZ} - I^2(R_{\theta-1} + R_{\theta-2})]$**
Contato prejudicado e aquecimento dos contatos das derivações, RPN [РПН] ou PBV [ПБВ] provoca a formação de uma película, erosão da superfície aumento da resistência intermediária.	Aquecimento e erosão dos contatos	Resistência à corrente contínua: **$R_{\theta-1}+Rk$** e **$R_{\theta-2}+Rk$**
Deslocamento mecânico ou aquecimento do condutor provoca sua ruptura ou queima e mudanças correspondentes da resistência do circuito condutor	Ruptura da rede	Corrente de magnetização **I_1** e perdas XX a través de **R_m** Resistência à corrente contínua **$R_{\theta-1}$** and **$R_{\theta-2}$**
Ações mecânicas ou perturbações podem ocasionar danos ao isolamento dos elementos do condutor magnético e gerar um contorno, ligado ao fluxo magnético principal. A corrente circulante resultante provoca um aumento das componentes ativas e indutivas da corrente de magnetização e um aumento das perdas de stand-by.	O curto-circuito das folhas de aço eletrotécnico, violação do isolamento dos fusos de tensão, dentre outros, e no resultado disto formam-se contornos das espirais em curto-circuito, ligadas à corrente principal; o aterramento incorreto do condutor magnético curtos inter-espirais e curtos dos condutores paralelos, pertencentes a diferentes espirais violação do isolamento dos parafusos de compressão, deslocamento das bobinasc, assim como defeitos RPN [РПН] que provocam mudanças da resistência magnética no local do circuito magnético	Corente de magnetização **I_1** e perdas XX a través de **R_m**

2. Determinação do Coeficiente de Transformação

O coeficiente de transformação (K) é numericamente igual à relação entre a tensão da bobina VN [BH], U_V, e a tensão da bobina NN [HH], U_N, durante o regime de stand-by do transformador e eqüivale aproximadamente, mas com suficiente grau de precissão, à relação entre o número de espirais das bobinas

$$K = \frac{U_V}{U_N} \approx \frac{4{,}44 f w_V \cdot F \cdot 10^{-8}}{4{,}44 f w_N \cdot F \cdot 10^{-8}} = \frac{w_V}{w_N}$$

O coeficiente de transformação é determinado com ajuda de uma ponte especial ou a través de dois voltímetros. Nas condições de operação isto garante determinar a correção da instalação do dispositivo comutador (após mudança de posição do PBV [ПБВ], e após trabalhos de desconexão da unidade RPN [РПН] e similares.) assim como posteriormente à reparação do transformador com troca ou reconstrução das bobinas. A medição é executada geralmente em todas as posições do RPN [РПН].

Os resultados das medições são comparados aos cálculos ou aos dados do manual de certificação. Pelo padrão IEEE, os resultados das medições são considerados aceitáveis, se o desvio das magnitudes não ultrapassar 0.5% .

No processo de operação, o coeficiente de transformação pode mudar somente por causa de danos nas bobinas, e o desvio tolerável é determinado principalmente pelo erro da medição. Outra causa de variação do coeficiente de transformação pode ser o desajuste do trabalho da unidade RPN [РПН]. O coeficiente de transformação constitui um importante indicador da qualidade das reparações, sobre tudo de aquelas que incluem a troca de bobinas.

Em alguns casos, o desvio tolerável pode ser também insuficiente, por exemplo ao determinar o número de espirais nos degraus das bobinas reguladoras, assim como nas bobinas VN [BH] com um número grande de espirais.

A determinação do número de espirais em enrolamentos paralelos constitui uma tarefa particular. Nestes casos se requer uma medição em conexão em oposição das partes paralelas medindo a corrente de deseqüilibro.

3. Medição da corrente e perdas no regime de stand-by

A magnitude das perdas e da corrente no regime de stand-by em condições de tensão nominal constituem importantes características para o controle da qualidade da fabricação, assim como da reparação do transformador (se precisar, por exemplo, da separação em camadas do jugo superior do núcleo magnético).

As perdas específicas totais no aço estão constituídas pela soma de três componentes: perdas na histerese, perdas nas correntes turbulentas, assim como outras perdas adicionais. A dependência de cada componente com a tensão (indução magnética) é não linear, de maneira que seriam irracionais as tentativas de determinar

as perdas em condições de tensão nominal, a partir de dados obtidos em medições a baixas tensões.

A corrente no regime de stand-by está formada pelas componentes: ativa, indutiva (corrente de magnetização) e de capacitância (Fig. 2).

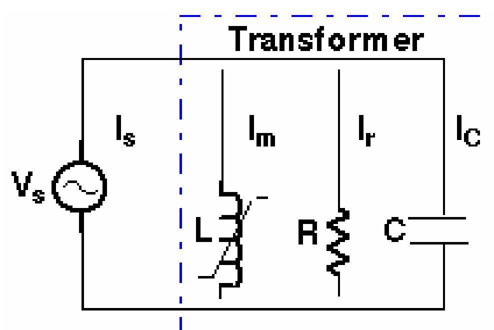


Fig. 2 Componentes da corrente do regime de stand-by

A componente de capacitância se determina a partir da capacitância longitudinal da bobina alimentada. Esta componente, em certos casos, para bobinas com suficiente capacitância do isolamento das espirais (do tipo entrelaçado), pode provocar um efeito considerável. A magnitude da componente ativa é determinada, quase exclusivamente, pelas perdas no aço

$$I_{0R} = \frac{P_{XX}}{10 \cdot S_{(MBA)}}.$$

De acordo com a lei de Ohm, para o circuito magnético, a magnitude do fluxo magnético é proporcional à relação dos valores da corrente de magnetização e da resistência magnética.

$$F = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot w}{r_m} = k \cdot \frac{I_0}{r_m}$$

Logo, qualquer distorção do circuito magnético gera mudanças da corrente no regime de stand-by, o que faz dela uma característica importante para o diagnóstico de defeitos.

Medição da corrente e perdas no regime de stand-by em baixa tensão pelo esquema de comparação

Durante a operação, as perdas e a corrente no regime de stand-by são medidas a baixa tensão, freqüentemente 220 ou 380 V, a partir da alimentação monofásica. Isto permite conhecer as perdas e a corrente de cada fase por separado, e consequentemente, possibilita a comparação entre elas para assim certificar-se que o transformador possui uma correta correlação de perdas e não contem defeitos. A medição se realiza até a injeção, na bobina, de uma corrente contínua (medição da resistência das bobinas à corrente contínua, medição da resistência do isolamento).

O teste do regime de stand-by, para transformadores monofásicos, é efetuado fornecendo, do lado NN [HH], uma tensão de 380 V na freqüência de 50 Hz. A tensão

fornecida no deve desviar-se do valor indicado nos limites de precisão dos instrumentos de medição. Medem-se a tensão fornecida, a corrente e a potência P, utilizada pelo transformador testado e pelos instrumentos de medição.

No transformador trifásico são realizados três testes, segundo a Fig. 3, a partir da alimentação pelo lado NN [HH]:

1) é colocada em curto-circuito a bobina da fase ***a***, alimentam-se as bobinas das fases ***b*** e ***c***
2) é colocada em curto-circuito a bobina da fase ***b***, alimentam-se as bobinas das fases ***a*** e ***c***
3) é colocada em curto-circuito a bobina da fase ***c***, alimentam-se as bobinas das fases ***a*** e ***b***

Usando outra metodologia é realizada a medição da corrente monofásica com o fornecimento de uma tensão, geralmente de 10 kV do lado VN [BH] nas mesmas posições RPN [РПН] (PBV [ПБВ]).

A potência ativa, em Watts, medida com potenciômetro, é igual a

$$P = U \bullet I \bullet \cos \varphi = K_w \bullet \alpha_w$$

onde K_w – é a constante do potenciômetro

α_w- número de divisões da escala, mostrados com a agulha ou raio luminoso do instrumento. As perdas no transformador são calculadas pela fórmula

$$P_o = P - P_{inst.med}$$

onde $P_{inst.med}$ – são as perdas nos instrumentos de medição

As perdas nos instrumentos são determinadas pela fórmula

$$P_{inst.med} = U^2 \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_w} \right)$$

onde

U – é a tensão, na qual foram realizadas as medidas das perdas, dada em V.

R_v e Rw – são, respectivamente, as resistências ativas do voltímetro e da bobina à tensão do potenciômetro (a partir do manual de instruções dos instrumentos).

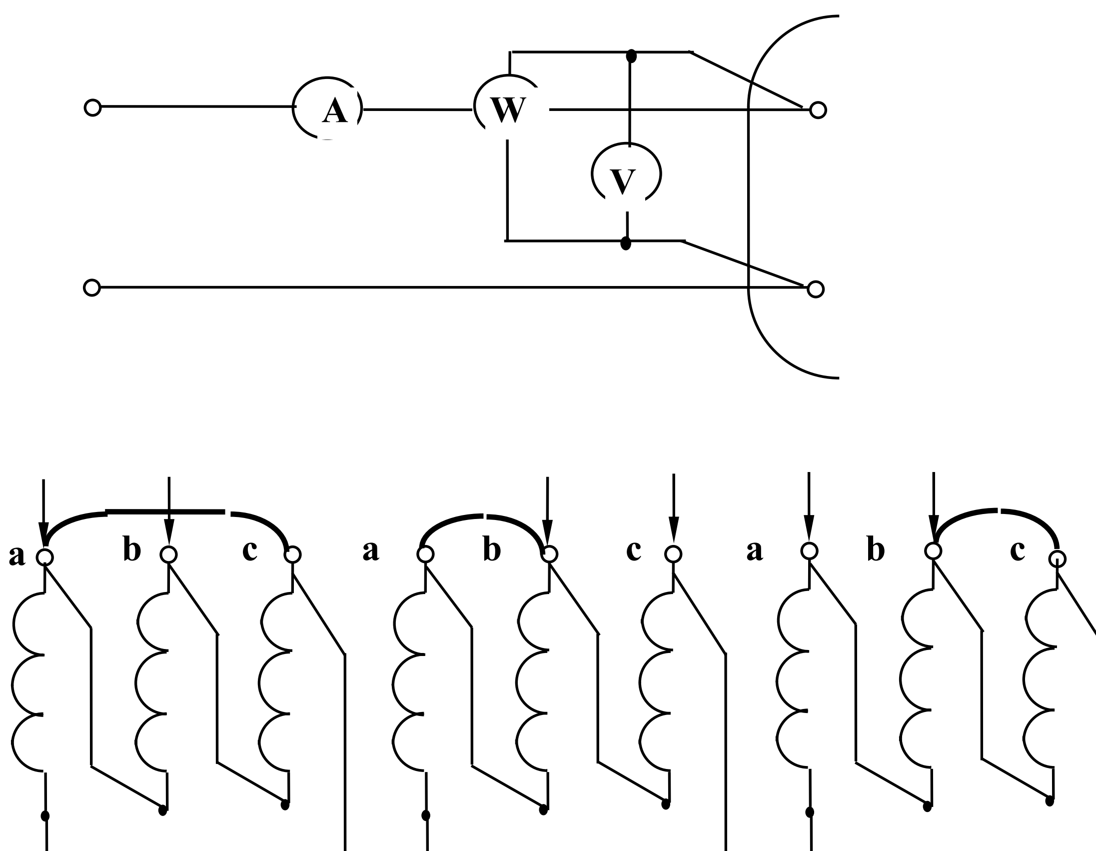


Fig. 3 Medição das perdas e da corrente no modo da stand-by

No sistema trifásico com núcleo magnético de barra, a relação entre as correntes de magnetização é proporcional à relação entre as resistências magnéticas. A resistência comum às correntes das fases externas é praticamente igual, porém maior que a resistência à corrente da fase intermediária. Logo, as correntes nos núcleos externos são praticamente iguais, porém maiores que as correntes do núcleo intermediário.

É evidente então, que nos testes de curtos-circuitos consecutivos das fases, as correntes e perdas no primeiro e no terceiro teste devam ser praticamente iguais, e maiores no teste 2, ao curto-circuitar a fase ***b*** em correspondência com a relação entre as resistências magnéticas. Normalmente, para os transformadores trifásicos, o valor da relação das perdas não deve desviar-se mais do que em 5% dos valores dos manuais de instrução (valores genéricos). Para transformadores monofásicos, a diferença entre os valores obtidos e dos genéricos no deve, em geral, ser maior do que 10%.

Ao avaliar a variação das correntes do regime de stand-by assume-se, que na maioria dos casos, o estado defeituoso pode ser caraterizado a partir de uma diferença superior a 10% dos valores das correntes nas fases externas em comparação a medições precedentes.

Em certos casos, um aumento relativo das perdas (por exemplo acima de 30%) em comparação a seus valores iniciais (genéricos) é considerado um sintoma de defeito. Porém, em equipamentos sem defeitos, após alguns anos de operação, pode ser constatado um aumento uniforme das perdas a partir de medidas a baixa tensão.

Em geral, o método fornecido é mais efetivo na avaliação do estado de um transformador que possua sintomas de danos, por exemplo, após a ativação da defesa a gás. Além disso, a medição das componentes ativas e indutivas da corrente com ajuda, por exemplo, do Analisador Doble M-4000 em todos os degraus do PU [ПУ], permite detectar, em alguns casos, a discrepância na posição do PU [ПУ]. Também permite detectar defeitos no RPN [РПН] do tipo reator.

A magnetização remanescente, como resultado da repentina desconexão da tensão ou salto na corrente a partir de uma transição sem passar pelo zero, pode interferir nos resultados das medições.

É recomendado eliminar a magnetização remanescente transmitindo repetidamente correntes contínuas com polaridades opostas a través das bobinas. A magnitude da corrente inicial não deve ser inferior ao dobro da corrente do regime de stand-by. Cada valor posterior e consecutivo da corrente contínua deverá ser 30-40% menor que o anterior. A corrente, com a qual termina o processo de desmagnetização, não deve ser maior que o valor efetivo esperado no teste do regime de stand-by a baixa tensão. A desmagnetização é realizada a partir da injeção de corrente por uma das bobinas de cada núcleo do sistema magnético.

3. Medição da resistência do curto-circuito

A magnitude da resistência total do curto-circuito (**Z_K**), expressada em porcentos e chamada de tensão de curto-circuito **u_K**, está indicada no manual do transformador. Na prática é mais conveniente determinar o valor de **Z_k** em Ohm:

$$Z_k = \frac{u_k\% \cdot U_{nom}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{nom}}, Ohm$$

onde – **u_K** é a tensão de curto-circuito para o regime analisado, dada em %;

U_{nom} – é a tensão nominal linear da bobina alimentada no ramal respectivo, em V;

I_{nom} – é a corrente nominal da bobina injetada no ramal dada.

Tanto a componente reativa (reactância) X_S, como a ativa R_k constituem características de diagnóstico

$$Z_k = \sqrt{X_S(f) + R_k(t^0)}$$

Em medidas na freqüência comercial, $Z_k \approx X_S$

A reactância de KZ [КЗ] é expressada pela conhecida fórmula de Rogovsky:

$$Xs = \frac{24{,}8 \bullet I_f \bullet w \bullet \rho \bullet \Sigma RD}{E \bullet H \bullet 10^4}, \text{ dada em \%}$$

onde (veja Figura) $\sum RD = \frac{b_1 \bullet R_1}{3} + c\,R_{12} + \frac{b_2 \bullet R_2}{3}$, em см^2

I_f – corrente de fase nominal, dada em A; w – número de espirais;

E – número de Volts numa espiral; $H = \frac{1}{2}(H_1 + H_2)$ – altura média da bobina.

Assim, a reactância de KZ [КЗ] e, em conseqüência, a resistência de KZ [КЗ] dependem em grande medida das dimensões geométricas das bobinas e constituem padrões efetivos de diagnóstico da deformação das bobinas em KZ [КЗ].

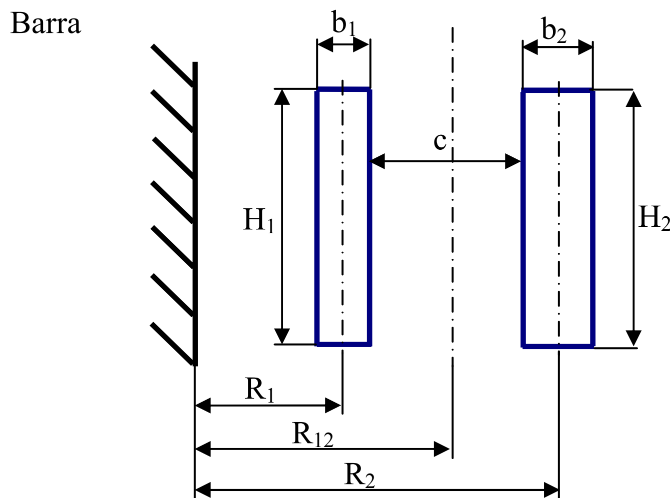


Fig. 4. Parâmetros geométricos das bobinas

3.1 Metodologia da medição

Durante a operação, as medições da resistência de curto-circuito (Z_κ) são realizadas no transformador totalmente desligado pelo método do amperímetro e voltímetro com uma tensão da rede de alimentação de até 400 V. Ao medir Z_κ nos transformadores trifásicos é colocada uma tensão nas três fases do lado da bobina ligada em "estrela" com o conector obrigatório do condutor em zero. A medição dos valores de corrente e tensão é realizada fase a fase. Em todas as medições de Z_κ, as bobinas NN [HH] devem ficar conectadas em "triângulo".

Na Fig. 5 está descrito o esquema de medição de Z_κ num auto-transformador para um par de bobinas, VN-NN [BH-HH]. No esquema não são mostradas as bobinas reguladoras, já que sua presença não muda o esquema fundamental de medição, e é levada em conta a posição de RPN [РПН]. Os esquemas de medição são introduzidos a partir da conexão dos instrumentos na fase A. As medições nas fases B e C são realizadas de maneira análoga.

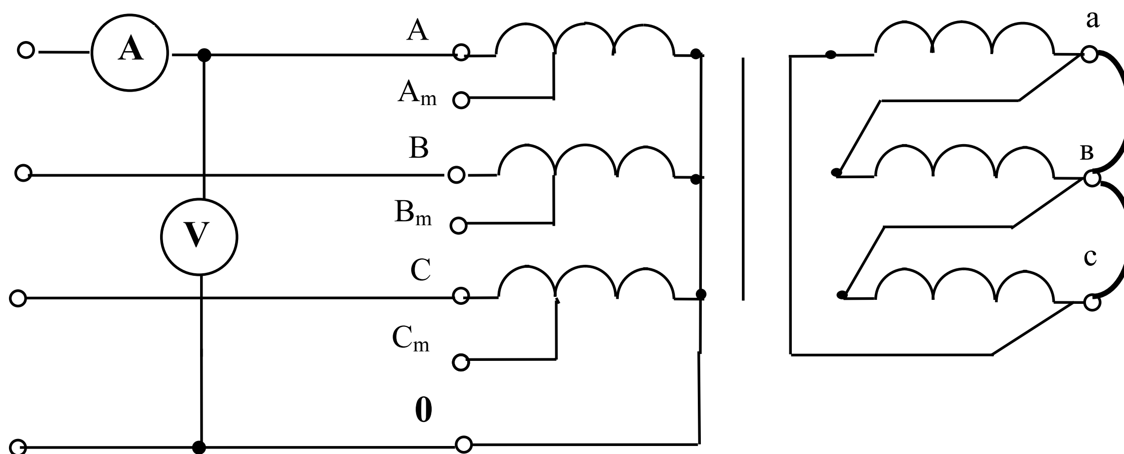


Fig. 5 Esquema de medição da resistência de curto-circuito do auto-transformador para um par de bobinas VN-NN [BH-HH]

Ao escolher o esquema de medição é preciso considerar a disposição das bobinas nos núcleos e os esquemas de conexão das bobinas e de regulação de tensão para cada tipo específico de transformador. A seleção do esquema de medição da resistência de curto-circuito deve ser feita em correspondência com as recomendações descritas na tabela

Tabela 2 – Esquemas de medição de *Zк* recomendados

№№ p/p	Tipo de transfor-mador	Potência, MVA [MBA]	Classe de tensão	Regulação da tensão	Distribuição das bobinas no núcleo	Par de bobinas recomendadas para a medição
1	ATDZTN [АТДЦТН]	63, 125 200, 250	220	RPN [РПН] em linha SN [CH]	NN-SN-VN-RO [HH-CH-BH-PO]	$VN\text{-}SN_{nom}$ [BH-CHном] $SN_{nom}\text{-}NN$ [CHном-HH]
2	ATDZTN [АТДЦТН]	125,200, 250	330	o mesmo	NN-RO-SN-VN [HH-PO-CH-BH]	$VN\text{-}SN_{nom}$ [BH-CHном] $VN\text{-}SN_{max}$ [BH-CHмакс.] $SN_{nom}\text{-}NN$ [CHном-HH]
3	ATDZTN [АТДЦТН]	125	220	o mesmo	NN-RO-SN-VN [HH-PO-CH-BH]	$VN\text{-}SN_{nom}$ [BH-CHном] $SN_{nom}\text{-}NN$ [CHном-HH] $SN_{min}\text{-}NN$ [CHмин-HH]
4	ATDZTN [АТДЦТН]	125, 200	330	o mesmo	NN-RO-SN-VN [HH-PO-CH-BH]	$VN\text{-}SN_{nom}$ [BH-CHном] $SN_{min}\text{-}NN$ [CHмин-HH] $SN_{nom}\text{-}NN$ [CHном-HH]
5	ATDZTN [АТДЦТН]	250, 500	500	RPN [РПН] no neutro VN [BH]	NN-RO-SN-VN [HH-PO-CH-BH]	$VN\text{-}SN_{nom}$ [BH-CHном] $VN\text{-}SN_{max}$ [BH-CHмакс.] $SN_{nom}\text{-}NN$

						[СНном-НН]
6	ATDZTN [АТДЦН]	400	330	o mesmo	RO-NN-VN [РО-НН-ВН]	VN_{nom}-NN [ВНном-НН] VN_{max}-NN [ВНмакс-НН]
7	TRDZTN [ТРДЦН]	63	330	o mesmo	RO-NN_1(NN_2)-VN [РО-$НН_1$($НН_2$)-ВН]	VN_{nom}-NN_1 [ВНном-$НН_1$] VN_{nom}-NN_2 [ВНном-$НН_2$] VN_{max}-NN_1(NN_2) [ВНмакс-$НН_1$($НН_2$)]
8	TRDZTN [ТРДЦН]	63, 80, 125	110	o mesmo	NN_1(NN_2)-VN-RO [$НН_1$($НН_2$)-ВН-РО]	VN_{nom}-NN_1 [ВНном-$НН_1$] VN_{nom}-NN_2 [ВНном-$НН_2$]
9	TRDZTN [ТРДЦН]	63	150	o mesmo	NN-VN-RO [НН-ВН-РО]	VN_{nom}-NN_1 [ВНном-$НН_1$] VN_{nom}-NN_2 [ВНном-$НН_2$]
10	TRDZTN [ТРДЦН]	63, 100, 160	220	o mesmo	NN-VN-RO [НН-ВН-РО]	VN_{nom}-NN_1 [ВНном-$НН_1$] VN_{nom}-NN_2 [ВНном-$НН_2$]
11	AODZTN [АОДЦТН]	167, 267	500	RPN [РПН] em linha SN [СН]	NN-SN-VN;RO-KO [НН-СН-ВН;РО-КО]	VN-SN_{nom} [ВН-СНном] SN_{nom}-NN [СНном-НН]
12	AODZTN [АОДЦТН]	333, 417	750	RPN [РПН] no neutro VN [ВН]	NN-SN-VN;RO-KO [НН-СН-ВН;РО-КО]	VN-SN_{nom} [ВН-СНном] SN_{nom}-NN [СНном-НН]
13	Auto-transformaor sem RPN [РПН]			PBV [ПБВ] (e sem ele)	NN-SN-VN [НН-СН-ВН]	VN-SN [ВН-СН] SN-NN [СН-НН]
14	Modulares			PBV [ПБВ] (e sem ele)	VN_2-NN-VN_1 [$ВН_2$-НН-$ВН_1$]	VN_{nom}-NN [ВНном-НН]
15	Modulares			PBV [ПБВ] (e sem ele)	NN-VN [НН-ВН]	VN_{nom}-NN [ВНном-НН]
16	TDTN [ТДТН]	63, 80		RPN [РПН] no neutro VN [ВН], PBV [ПБВ] em SN [СН]	NN-SN-VN-RO [НН-СН-ВН-РО]	VN_{nom}-SN_{nom} [ВНном-СНном] SN_{nom}-NN [СНном-НН]

Comentários

1 Em todas as medições está prevista a alimentação da tensão na bovina, indicada primeiro, e a instalação de curto-circuito na bovina, indicada como segunda.

2 Nos transformadores №№ 1-2 a bovina RO [РО] está conectada ao ponto de junção das bobinas em série e comum, e os №№ 3, 4, 11 – está conectada entre as bobinas em série e comum.

3.2 Requerimentos dos meios de medição

Para a medição da resistência de curto-circuito, *Zк*, são utilizados voltímetros e amperímetros de classe não inferior a 0,5.

As medições nos testes são realizadas pela conexão direta dos instrumentos ou pela utilização de complexos de medição К-540 (К-50, К-505).

Para a medição de *Zк* com a precisão exigida no uso de transformadores de corrente, se usa um transformador de corrente de classe não inferior a 0,2.

A seção do curto-circuito, instalado na derivação, deve corresponder no menos do que ao 30% da bitola dos fios condutores da bobina do transformador. A bitola dos fios condutores da bobina deverá ser determinada pelo valor da corrente nominal, a partir da densidade média de corrente nas bobinas, que é igual a 3 A/mm^2.

A potência da fonte durante a medição não deve ser menor que 35 kVA.

Todas as conexões dos fios de alimentação e de curto-circuito devem ser bem asseguradas. A longitude do curto-circuito deverá ser mínima. Os locais dos contatos deverão ser meticulosamente limpados até brilhar.

A influência do curto-circuito pode ser avaliada a partir da equação

$$R_k = R_{prim} + n^2 (R_{\sec} + R_{curt})$$

onde R_{prim}, R_{sec} e R_{curt} são as resistências da bovina primária, da bovina secundária e do curto-circuito, respectivamente;
n- é o coeficiente de transformação

As medições devem ser repetidas três vezes e no cálculo serão usados os valores médios da corrente e da tensão assim obtidos. Se durante as medições, a freqüência da rede de alimentação, f ', for diferente da nominal, igual a 50 Hz, os valores obtidos de $Z'_к$, em Ohm, deverão ser convertidos à freqüência nominal a partir da fórmula

$$Z_к = \frac{50}{f'} \cdot Z'_к \ ,$$

onde *f '* – é a freqüência da rede de alimentação, na qual foram realizadas as medições.

Se a magnitude da corrente durante a medição for pequena, a corrente de magnetização pode afetar os resultados das medições.

Para o esquema, no qual a bobina VN [BH] está conectada em “estrela”, $Z_к$ dada em Ohm, para cada uma das fases é determinada pelas fórmulas seguintes

$$Z_B = \frac{Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC}}{2} \ ,$$

$$Z_C = Z_{BC} - Z_B \ ,$$

$$Z_A = Z_{AB} - Z_B$$

Para o esquema, no qual a bobina VN [BH] está conectada em “triângulo”, $Z_к$, em Ohm, para cada fase será dada por

$$Z_A = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{4 \cdot Z_{AB} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} - Z_{AC}} - \left(Z_{AB} + Z_{BC} - Z_{AC} \right) \right],$$

$$Z_B = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{4 \cdot Z_{BC} \cdot Z_{AC}}{Z_{BC} + Z_{AC} - Z_{AB}} - \left(Z_{BC} + Z_{AC} - Z_{AB} \right) \right],$$

$$Z_C = \frac{1}{2}\cdot\left[\frac{4\cdot Z_{AC}\cdot Z_{AB}}{Z_{AC}+Z_{AB}-Z_{BC}}-\left(Z_{AC}+Z_{AB}-Z_{BC}\right)\right],$$

onde $Z_{(A,B,C)}$ – é a resistência de fase e $Z_{(AB,BC,AC)}$ – é a resistência linear.

Avaliação dos resultados das medições

A avaliação do estado das bobinas do transformador é realizada a través da comparação dos valores de *Zк,* em %, medidos por fases com os dados de medições precedentes. No caso de não existirem medições anteriores deverão ser usados os dados do manual. O desvio será calculado pela fórmula

$$\Delta Z_к = \frac{Z_к - Z_{кb}}{Z_{кb}}\cdot 100\ ,$$

onde $Z_{кb}$ – é a resistência base de curto-circuito. Normalmente o valor limite da divergência $\Delta Z_к$ é normalizado no nível de 3% (Tabela).

Por sua vez, é preciso observar que a magnitude da variação relativa da resistência KZ [К3] a partir do surgimento da deformação da bobina depende da construção do transformador. Para mais detalhes, ler o tópico "Determinação da deformação das bobinas em KZ [К3]".

Tabela 21.5.3 Valores limites de alguns padrões de diagnóstico, recomendados em documentos normativos

Métodos de diagnóstico	**Normas IEEE Std 62-1995**	**Normas russas**
Medição do coeficiente de transformação	Diferença com os dados padronizados de fábrica não maior que 0.5 % Valores iguais para fases diferentes do transformador trifásico	Ao entrar em operação: a diferencia não deve ser maior que 2% dos valoes medidos nos ramais respectivos das outras fases. Durante a vistoria não deve ser maior que 2% do coeficiente de transformação, calculado pela tensão do ramal
Medição da corrente e perdas no regime de stand-by	Se padroniza a magnitude da corrente Comparação dos resultados com dados precedentes ou com transformadores monofásicos, ou entre as fases dos transformadores trifásico Para a maioria dos transformadores, os valores de corrente para as fases externas são iguais e menores para a fase intermediária Na maioria dos casos o estado defeituoso é caracterizado por diferenças maiores que 10% entre os valores das correntes	A magnitude das perdas é padronizada A relação entre perdas não é maior que 5% Em operação, a diferença com os parâmetros iniciais não deve ultrapassar os 30%

	nas fases externas ou pela comparação com medições precedentes.	
Medição da resistência das bobinas à corrente contínua	As resistências das bobinas dos transformadores trifásicos, medidas em ramais iguais de fases diferentes, sob a mesma temperatura não deve ultrapassar 2%	Se efetua em todos os ramais As resistências das bobinas dos transformadores trifásicos, medidas em ramais iguais de fases diferentes, sob a mesma temperatura não deve ultrapassar 2%
Medição da resistência de curto-circuito	Variação limite maior que ± 3%	Padroniza-se para transformadores No inicio: não deve ultrapassar mais 5 % dos valores no ramal principal Durante o processo de operação e durante a vistoria: ultrapassar os valores iniciais não mais que em 3%. Entre as fases, não mais 3%

4. Medição das perdas de curto-circuito

As perdas de curto-circuito incluem perdas principais, provocadas pela corrente uniforme equivalente nas bobinas e perdas adicionais nas bobinas e estrutura metálica. Normalmente, no protocolo dos testes de fábrica são indicados os dados reduzidos à temperatura de 75^0C com ajuda da expressão

$$P_{КЗ}(75^0 C) = k\Sigma(I^2 \cdot R)_{75} + \frac{1}{k} P_{доб}(75)$$

onde

$$k = \frac{75 + 235}{t^0 C + 235}$$

As perdas com o fluxo de dissipação podem ser calculadas a partir da medida das perdas combinadas subtraindo as perdas principais nas bobinas. Por sua vez, perdas adicionais nas bobinas podem ser determinadas a partir do teste em KZ [КЗ] sem caixa.

As perdas com o fluxo de dissipação, fundamentalmente nas bobinas, podem servir como um padrão de diagnóstico efetivo, em particular para identificar o contato entre condutores paralelos das bobinas. Deformações das bobinas o de suas partes também provocam mudanças consideráveis nas perdas de dissipação

$$P_{adicional} = P_{adicional.bobina} + P_{adicional.construt}$$

As possibilidades para diagnóstico, a partir dos valores das perdas com o fluxo de dissipação, são mais efetivas se realizadas pelo método de determinação da dependência com a freqüência das perdas de dissipação.

Dependência das perdas de dissipação com a freqüência

O método foi desenvolvido no instituto IREC, do Canadá, no final dos anos 70. À diferença do método comum de medição da resistência KZ [КЗ], este método utiliza a dependência com a freqüência das componentes ativas e indutivas da corrente КХ no diapasão de freqüências 20-600 Hz.

Para cada freqüência são medidos: o valor efetivo da corrente I_{rms}, a tensão E_{rms} e a potência ativa P, e são calculados os valores da resistência ativa de dissipação, Rs, e da resistência total, Zk,

$$R = \frac{P}{I_{rms}^{\ \ 2}}$$

$$Z_k = \frac{E_{rms}}{I_{rms}}$$

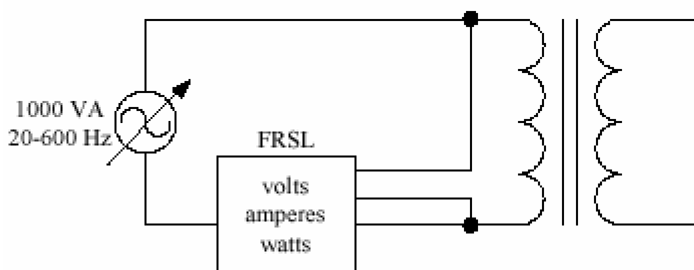


Fig. 5 Esquema de medição da dependência com a freqüência das perdas de dissipação.

A dependência da resistência com freqüência é sugerida, de maneira aproximada como

$$R_S = kf^{\alpha}$$

onde α=1,4-1,8

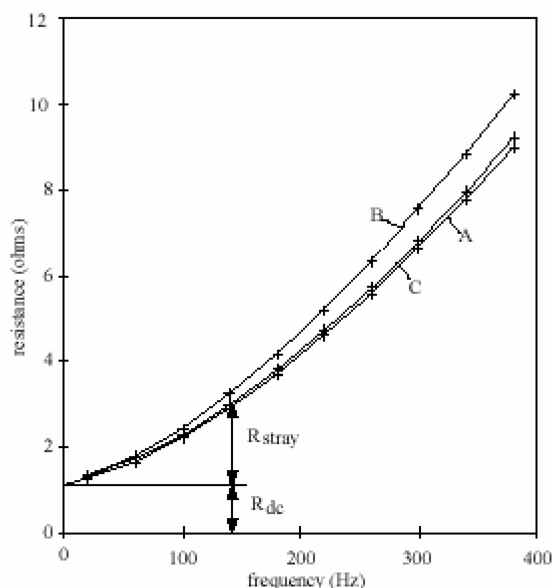


Fig. 6 Dependência com a freqüência das perdas de dissipação. Aumento da resistência na fase defeituosa B

5. Medição da resistência à corrente contínua das bobinas

O principal objetivo do método é a detecção de contatos deteriorados, fundamentalmente nos locais de conexão entre derivações e entradas, assim como contatos abertos RPN [РПН]. O modelo simplificado dos defeitos característicos é mostrado na Figura

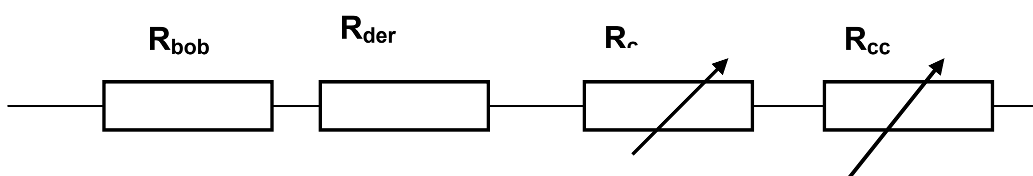


Fig. 21.5.7 Modelo de defeitos detectados a partir da medição da resistência à corrente contínua das bobinas.

- R_{bob} –resistência da bobina
- R_{der} – resistência das derivações
- R_c – resistência intermediária (*transitória*) da conexão das derivações (contatos não abertos)
- R_{cc} – resistência intermediária (*transitória*) dos contatos abertos do comutador

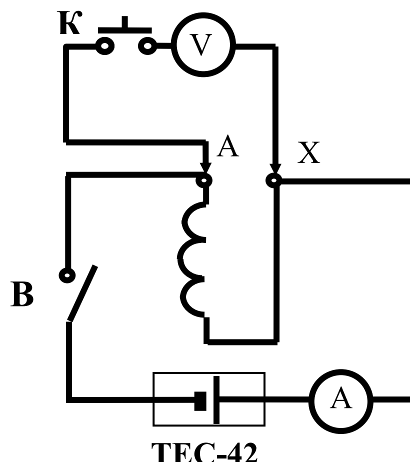


Fig. 8 Esquema de medição da resistência à corrente contínua.

A resistência das bobinas à corrente contínua é medida pelo procedimento da queda de tensão ou (freqüentemente em transformadores de baixa potência) com ajuda de uma ponte. A resistência deve medir-se em todos os ramais das bobinas.

Em transformadores potentes deve-se levar em conta dois processos transitórios ao ligar a tensão da corrente contínua: em virtude da variação da permeabilidade magnética e da considerável inductância das bobinas.

As medições devem ser realizadas com o sistema magnético saturado. Para diminuir a constante de tempo, determinada pela relação entre a inductância e a resistência medida, é recomendado utilizar o esquema representado na Figura ligando sucessivamente, e por curtos intervalos de tempo, um resistor cuja resistência seja 5-10 vezes maior que a resistência medida.

Os fios condutores do circuito do voltímetro são conectados aos clipes do transformador diretamente a través do botão interruptor. Com o objetivo de diminuir o tempo de estabelecimento da corrente, é recomendado utilizar certos esquemas de conexão das bobinas que sejam permitidos pela construção, com os quais não sejam gerados fluxos que se fechem pelo sistema magnético do transformador (conexão NN [HH] em triângulo aberto, esquema de seqüência zero).

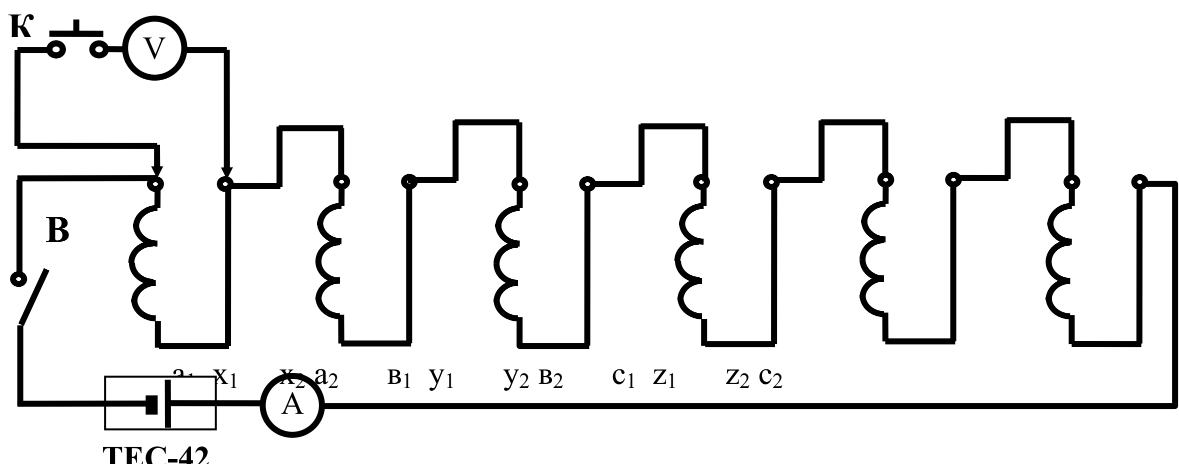


Fig. 9 Medição da resistência de bobinas multi-ampêricas NN [HH] pelo esquema do triângulo aberto.

Possíveis defeitos nas bobinas podem ser a ruptura ou curto-circuito de fios condutores paralelos ou uma solda quebrada (contato removido ou ruptura). Tais fenômenos normalmente induzem mudanças da resistência em alguns porcentos.

O aquecimento e a erosão dos contatos provoca um aumento do valor inicial da resistência intermediária (*transitória*) e a erosão dos contatos pode aumentar em varias vezes, e até dezenas de vezes, o valor inicial da resistência intermediária (*transitória*).

A magnitude inicial da resistência dos contatos desacoplados RPN [РПН] é normalmente de 40-200 mkOhm. Um prolongado fluxo da corrente pode deteriorar progressivamente as superfícies de contato devido à deposição, sobre as superfícies, de produtos da descomposição do óleo e a penetração de películas estranhas sob as plataformas de contatos. Um aumento da resistência intermediária (*transitória*) do contato em 3-4 vezes pode ser o sintoma de um estado defeituoso, após do qual pode esperar-se um crescimento em avalancha da resistência. Nesta fase, o estado dos contatos pode ser melhorado ligando-os repetidamente. Um aumento da resistência intermediária (*transitória*) em 5-10 vezes pode ser provocado pela erosão irreversível das superfícies e para o restabelecimento do seu estado normal pode ser requerido um tratamento mecânico especial ou a troca dos próprios contatos.

Os valores guia da resistência do circuito de certos dispositivos interruptores, estabelecidos na Confederação de Estados Independentes (CEI, ex União Soviética), estão indicados na Tabela 3.

Causas capazes de aumentar a resistência dos elementos do circuito podem ser:

- Pouca pressão de contato nos contatos comutadores ou fechados;
- Queima dos contatos principais e auxiliares do “contactor” (termo em inglês);
- Queima dos contatos do seletor devido à queda dos contatos móveis
- Queima dos contatos do seletor e do preseletor devido a funcionamento prolongado numa determinada posição;
- Enroscamento de má qualidade das juntas de parafusos ou compactação fraca dos contatos de pressão das derivações.
-

As resistências de bobinas iguais de fases diferentes, na ausência de defeitos, são praticamente equivalentes salvo nos raros casos quando as bobinas são confeccionadas por fios condutores de diferente bitola. Tal circunstância permite utilizar a diferença entre as magnitudes das resistências das bobinas de fases diferentes como padrão de diagnóstico.

Considera-se, que as magnitudes da resistência das bobinas dos transformadores trifásicos, medidas em ramais iguais de diferentes fases, sob a mesma temperatura não devem diferenciar-se em mais do que 2%. Porém, este critério pode não ser suficiente para avaliar o estado dos contatos do RPN [РПН] se a magnitude da resistência da bobina for muito maior que a resistência intermediária (*transitória*) dos contatos.

Na avaliação do estado dos contatos também são usados:

- Os valores da resistência, medidos em diferentes posições do reversor.

- A diferença entre resistências, medidas nos degraus pares e ímpares do RPN [РПН].
- O caráter da variação da resistência ao aumentar ou diminuir o número de espirais a partir da posição neutral (veja Figura).

Ao medir a resistência das bobinas conectadas em triângulo, podem ser obtidos os valores da resistência das fases por separado, segundo as seguintes expressões

$$R_a = R_{ac} + \frac{(R_{ac} + R_{bc} - R_{ab}) \cdot (R_{ac} + R_{ab} - R_{bc})}{2 \cdot (R_{ab} + R_{bc} - R_{ac})}$$

$$R_b = R_{ab} + \frac{(R_{ab} + R_{ac} - R_{bc}) \cdot (R_{ab} + R_{bc} - R_{ac})}{2 \cdot (R_{ac} + R_{bc} + R_{ab})}$$

$$R_c = R_{bc} + \frac{(R_{bc} + R_{ab} - R_{ac}) \cdot (R_{bc} + R_{ac} - R_{ab})}{2 \cdot (R_{ac} + R_{ab} - R_{bc})}$$

A resistência das bobinas depende da temperatura dos condutores. Para condutores de cobre é utilizada a seguinte dependência

$$R_{t_1} = \frac{R_{t_0} \cdot (t_1 + 235)}{(t_0 + 235)}$$, em Ohm

onde *t*- é a temperatura média da bobina

A fórmula ( ) é usada para relacionar os resultado da medição a certa temperatura, e também para estimar a temperatura do isolamento, por exemplo ao medir as características deste.

O erro absoluto da estimativa da temperatura da bobina, δt, depende do erro absoluto da medição da resistência segundo a equação

$$\delta t = \delta R \cdot (t_0 + 235)$$

Se o erro da medição da resistência é igual a 2%, então o erro da estimativa da temperatura em dependência da temperatura da bobina a partir das medidas de fábrica (por exemplo 20-40^{0}C) pode totalizar 5,1 – 5,5^{0}C.

Um erro considerável na determinação da temperatura pode afetar os resultados da comparação dos valores medidos de resistência das bobinas com os dados iniciais (por exemplo de fábrica), o que, pode ser significativo para transformadores monofásicos. Em certos casos, o erro de estimativa por efeito da temperatura pode ser reduzido a través da comparação, não dos valores absolutos, mas da relação entre as resistências das bobinas, medidas na fábrica, por exemplo, $\frac{R_{VN_{fab}}}{R_{NN_{fab}}}$ e em funcionamento $\frac{R_{VN_{fun}}}{R_{NN_{fun}}}$.

Tabela 21.3
Valores guia das resistências intermediárias (*transitórias*) dos contatos de RPN [РПН]. As medições são realizadas segundo o esquema: saída zero do "contactor" – contato imóvel do seletor, incluindo o pre-seletor.

Tipo de dispositivo interruptor	Valor máximo da resistência (mkOhm)	
	Braço Par	Braço Ímpar
SCV1-1100-W19	1400	1400
SDV1-1250-W19	1400	1400
SAV1-1600-013	1200	1200
SAV1-1600-W19	1300	1300
SDV1-630-W19	1300	1300
PHOA 110/1000-15	580	480
PHOA 110/1250-15	530	480
PHOA 110/1250-43	490	440
PHOA 220/800-13	580	480
PHOA 220/1000-15	530	480
PHOA 220/1250-15	530	480
PHOA 220/2000-17	580	480
PHTA 35/1250	420	420
PC-4-200	420	420
PC-4-400	2500	2500
PC-4-630	1400	1400
PC-9-200	2350	2350
PC-9-400	1350	1350
PC-9-630	1050	1050
PC-2,PC-3	4000	4000